

電子ビームからの高強度コヒーレント遷移放射による液体の吸収分光

ABSORPTION SPECTROSCOPY FOR LIQUID WITH THE HIGH-INTENSITY COHERENT TRANSITIONS RADIATION FROM ELECTRON BEAMS

斉藤秀輝^{A)}, 奥田修一^{A)}, 高橋俊晴^{B)}, S. Nam^{C)}

Hideki Saito^{A)}, Shuichi Okuda^{A)}, Toshiharu Takahashi^{B)}, Soon-Kwon Nam^{C)}

^{A)} Osaka Prefecture Univ.

^{B)} Kyoto Univ.

^{C)} Kangwon National Univ.

Abstract

The coherent radiation (CR) obtained when the bunch length of the high-energy electrons is small, can be used as a characteristic THz source. The strength of the CR is extremely high compared with that of the general small THz sources. Absorption spectroscopy experiments have been performed by using the coherent transition radiation (CTR) source with an L-band electron linac for various materials in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI). The light source is very stable. There have been few measurements for liquid with such a light source. In this study absorption spectroscopy has been performed for several kinds of liquid samples. The CTR spectrum was obtained by averaging over four measured results. The wavenumber dependence of the transmittance of light for the sample was obtained in a wavenumber range of 4-13 cm^{-1} . Future experiments will be performed by changing the temperature of the samples. The time-resolved analysis will be performed by using the linac in Osaka Prefecture University.

1. はじめに

サブミリ波からミリ波 (THz の周波数領域) における光の研究は近年、光源や計測技術の開発で、新たな研究分野として急速に発展している。THz 領域の電磁波に関する研究は長年行われてきたが、ここ 30 年ほどの間、短パルスレーザー照射による半導体の電流スイッチングを用いた小型 THz 光源、電子加速器をベースにした遠赤外 FEL や高出力コヒーレント光源が開発されてきた。計測技術の進展と利用分野が拡大され、イメージング、薬物の検査、医療分野での診断などへの応用・実用化が期待されている。

高周波電子線加速器において、高エネルギー電子のバンチ長が短い場合に強力なコヒーレントなシンクロトロン放射や遷移放射が得られ、特徴ある THz 光源として利用できる。これらはサブミリ波からミリ波の領域で連続なスペクトルを持ち、極めて強度が高い。コヒーレントシンクロトロン放射は、東北大学^[1]で初めて観測されて以来、光源としての開発や利用研究が行われてきた。京都大学原子炉実験所 (KURRI) では、L バンド電子ライナックを用いて、コヒーレント遷移放射(CTR)による吸収分光系が確立された^[2]。比較的簡単な配置で種々の物質に対して吸収分光を行うことができる特徴があり、一般の小型のテラヘルツ光源と比較して、極めて強度が高い。このような光源を用いて、液体に対する吸収分光の測定を行った例はほとんどない。本研究は、液体の吸収分光測定を行うことを目的とした^{[2][3]}。

2. コヒーレント THz 放射の特性

コヒーレント放射の放射過程の概念図を Figure 1 に示す。シンクロトロン放射や遷移放射の過程において、高エネルギー電子バンチから連続スペクトルを持つ放射が発生する。電子バンチと同程度かより長い波長の場合、各電子から放出される光の位相差が無視でき、放射の位相がそろうことで放射電場が重なり、バンチ内の電子数 N の 2 乗に比例した強度の放射が得られる。インコヒーレントの場合に比べて N 倍 (10^9 倍程度) の著しい強度の増大が起こる。放射のスペクトルは電子バンチの形状に依存し、サブミリからミリ波領域に広がる。この光源には、高いパルスピーク強度、高い平均強度、コヒーレンス、ブロードバンド (周波数が選択できる) などの特徴がある。

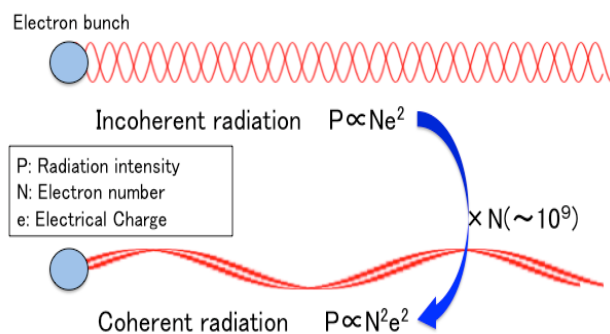


Figure 1: Radiation process of the coherent radiation.

3. 実験方法

KURRI 電子ライナックを実験に用いた。ビームのエネルギーは 42MeV、マクロパルス幅は 10 ns から 4 μ s、パルス繰り返しは可変で、通常は 13 Hz、マクロパルスのピーク電流は 100 mA であった。真空中に置かれたアルミニウム箔から後方に放射された CTR を真空容器内の金コート鏡で輸送した。吸収分光測定系の概念図を Figure 2 に示す。

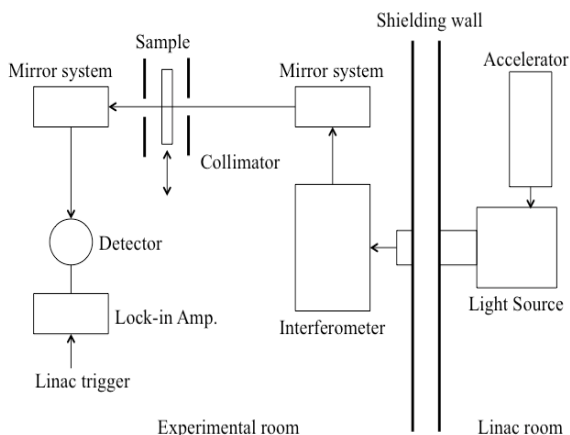


Figure 2: Experimental arrangement for the absorption spectroscopy.

光スペクトルの測定には、KURRI の高輝度ミリ波 THz 放射光分光装置を利用した。CTR は、真空容器の光学窓を通して加速器室外の実験室へ輸送した。マーチンパレット型干渉計から出た光は直線偏光で、直径 8 mm の光コレクタの位置に集束した。試料は、このコレクタのすぐ後方に置いた可動ステージ上に設置した。試料は、水、食塩水、グルコース水溶液で、厚さ 3mm の 2 枚の無水石英板で挟み、試料の厚みは約 120 μ m であった。試料の概念図を Figure 3 に示す。検出器は、液体ヘリウム冷却のシリコンボロメータである。

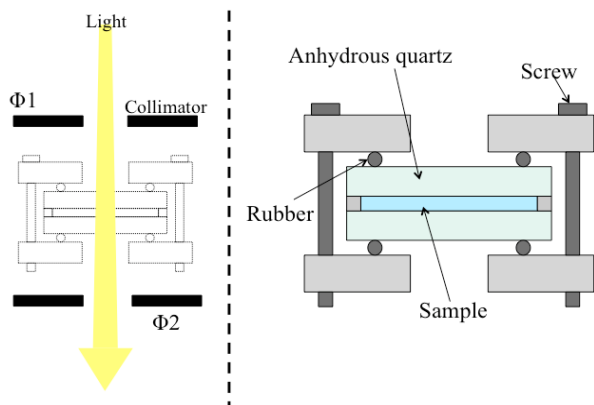


Figure 3: Schematic diagram of the sample holder.

マイクロパルス光は、電子ビームのマクロパルス間に一定の時間間隔で繰り返され、パルス列を形成する。ライナックからの実験用トリガー信号で動作

するロックインアンプにより、光強度を測定した。この系で真空窓の後の光路は空気中にある。光透過率は、試料がある場合とない場合の各 4 回の放射のスペクトルの測定結果を平均して割り算し、求めた。

4. 吸収分光実験の結果

これまでの実験配置で、コレクタ通過後の光の広がりにより、一部の光がサンプルフォルダにかかり、ロスしている可能性もあることが明らかになったので、光の広がりについて調べた。Figure 3 で、試料通過後のコレクタ $\Phi 2$ の直径を変化させて光強度を測定した。その結果を Figure 4 に示す。

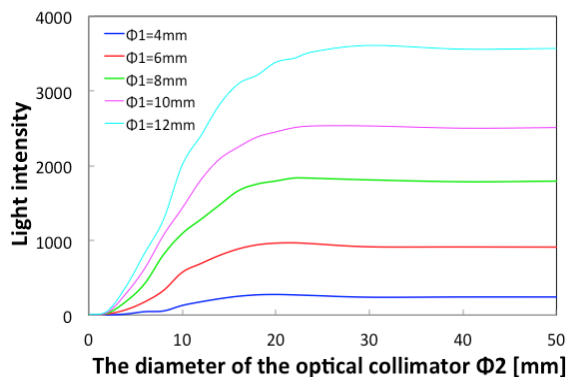


Figure 4: Measured intensity of light changing the diameter of the collimator.

この図から、コレクタ $\Phi 1$ の各値に対して、 $\Phi 2$ の直径が 30mm より大きい範囲で光強度はほぼ一定である。よってコレクタ $\Phi 2$ 位置での光の広がり直径 30mm 以下であると考えられる。これを考慮して、サンプルフォルダの穴の直径を 30mm にして実験を行った。今回の実験では、コレクタ $\Phi 1$ を 8mm にして測定したので、サンプルフォルダによる光のロスはないと考えられる。

試料がない場合の光源のスペクトルの 4 回の測定結果を重ねたものを Figure 5 に示す。波数分解能は 0.1 cm^{-1} であった。4~13 cm^{-1} の範囲において、光強度の変動による誤差は $\pm 1 \sim 2\%$ に収まり、非常に安定なスペクトルが得られた。

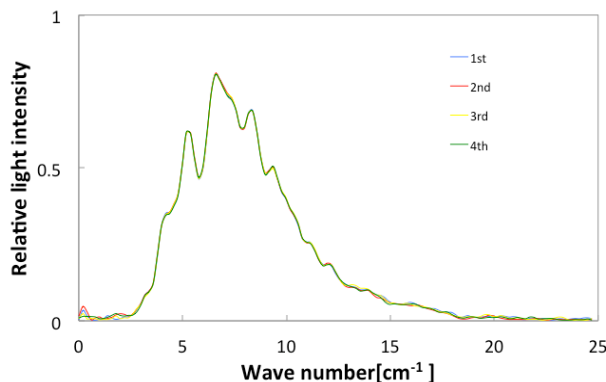


Figure 5: Four CTR spectra measured under the same conditions.

光強度が比較的低いほかの波数領域においては、誤差はかなり大きくなる。しかしこれは、検出器窓にスペクトルのフィルターを置くことで抑えることができる。スペクトル形状を決める主な要因は、電子バンチの形状である。また、光路において別の要因でわずかに変化する可能性がある。スペクトルの測定結果における周期的な振動は、真空容器の光学窓内での入射光と反射光の干渉であると考えられる。L バンドライナックからのビームにおけるバンチ長は、通常 10 ps より長く、これは 3 mm の長さ、または 3 cm^{-1} の波数に対応する。CTR の強度は、電子バンチ長より短い波長ではかなり低い。しかし 10 cm^{-1} を超える波数でも比較的高い放射強度がある。放射強度は、測定のためのプローブ光としては十分に強い。本測定では、最大 3 桁の増幅率を持つ検出器の増幅器は使用していない。このことから、試料の光透過率が 10^{-6} かそれより低い場合でも測定には十分な強度があることがわかる。

CTR の試料に対する透過率は、4 回の測定結果を平均したものを試料がない場合のスペクトル強度で割ることで算出した。水に対する光の透過率の波数依存性の結果を Figure 6 に示す。

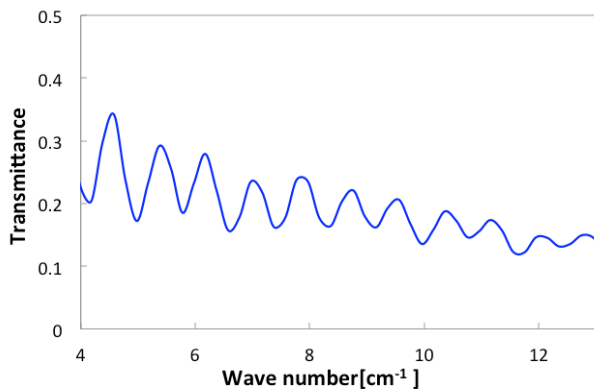


Figure 6: Wavenumber dependence of the transmittance of the CTR for water.

この透過率曲線に見られる周期的な振動は、入射光と無水石英板表面での反射光の干渉によるものである。この測定で、試料による透過率 20-30%に及ぶ光吸収とその波数依存性が明らかになった。この曲線から水の物性値が得られる。

次に光の強度を約 0.1 倍にして測定した時の水に対する光の透過率の波数依存性の結果を Figure 7 に示す。

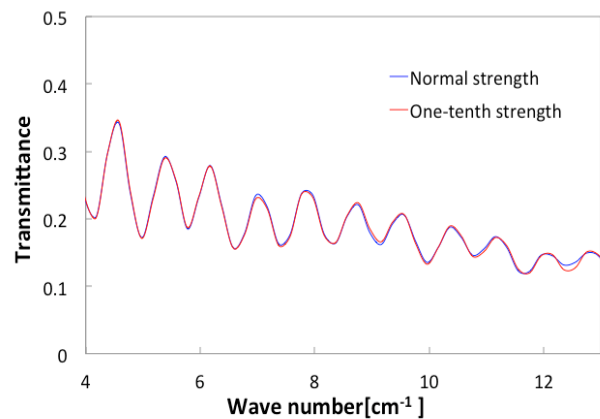


Figure 7: Intensity dependence of the transmittance of the CTR for water.

通常の強度と 0.1 倍の強度で比較してみると、ほとんど変化がないことがわかる。過去の実験では、わずかな差が確認できた結果もあり、今後解析を行う。また大阪府立大の電子ライナックで、強度依存性について調べるための時間分解分析実験を行う。

5. まとめと今後の課題

KURRI の L バンド電子ライナックの CTR 高原による液体の吸収分光を行い、それぞれの液体に対する THz 光の透過率を得た。今後、温度などの条件を変えて実験を行う。THz 領域での光と水の相互作用について新しい知見が得られると期待される。

本研究の一部は、京都大学原子炉実験所の共同利用研究として行われた。また本研究の一部は、平成 24-26 年度の KEK 大学等連携支援事業によった。

参考文献

- [1] T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, O. Konno, A. Kagaya, R. Kato, T. Kamiyama, Y. Torizuka, T. Nanba, Y. Kondo, Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka and M. Ikezawa, Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 1245.
- [2] S. Okuda and T. Takahashi, Infrared Phys. Technol. 51 (2008) 410.
- [3] M. Tonouchi, Terahertz Technology (2006)
- [4] 齊藤秀輝, 奥田修一, 高橋俊晴, 第 10 回日本加速器学会年会 (名古屋, 2013) SAP028.